第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

疏勒河流域中游地区玉米性状及单产的影响因子研究

刘焕才[1,2]， 史书琦[1]， 李 曼[1]， 张艳芳[1]， 韩 丽[1]

（1. 山西师范大学地理科学学院，山西 太原 030031；2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710062）

摘 要：疏勒河流域是中国西北重要的粮食产区，探明气候变化和人类活动对该地区粮食作物影响规律，可为区域粮食安全提供重要科学支撑。以地处疏勒河流域中游地区的玉门市为典型研究区，采用1990—2020年气象要素、田间管理、土壤属性和玉米单产等数据，分析玉米性状及单产对自然因素（最高温、最低温、太阳辐射、风速、降水）和人为因素（政策、灌溉量、施肥量）的敏感性，在此基础上，以2017年为典型年，运用DSSAT-CERES-Maize模型定量分析主要影响因子对玉米性状和气候单产的影响程度，探明研究区玉米生长发育的适宜条件。结果表明：(1) 在疏勒河流域中游地区，气候暖湿化特征显著；化肥施用量呈现出增加–减少的变化趋势，有效灌溉面积为持续增加趋势。(2) 玉米实际单产呈小幅增加趋势，其中趋势单产由于受到推广优质品种和农田水利建设等政策的影响，呈增加–减少–稳定的变化趋势，而玉米气候单产呈减少趋势，其对最高温和降水表现出强正向敏感度，对最低温表现出强负向敏感度；玉米性状对化肥施用量、有效灌溉面积和穗期、花粒期的最低温表现为强正向敏感度，对穗期、花粒期最高温表现为强负向敏感度。(3) 玉米生长发育的适宜条件为最高温（14.80~38.56 ℃）、最低温（−0.38~22.16 ℃）、太阳辐射（3.93~25.15 MJ·m^{-2}）、风速（0~3.81 m·s^{-1}）以及在实际降水基础上的灌溉量（15 mm）和施肥量（10 kg·hm^{-2}），在此范围内，最高温、最低温、风速和水肥因子与性状、单产存在“倒U型”关系，而太阳辐射与性状、单产存在“U型”关系。

关 键 词：玉米；影响因子；单产；性状；疏勒河流域

文章编号：1000－6060(2023)09－1453－14(1453～1466)

粮食安全是国家安全的基础，是经济发展、社会稳定的基石[1]。玉米作为我国主要粮食作物之一，2020年国内玉米产量达到2.66×10^9 t，约占全国粮食产量的38.93%。随着粮食需求量增长、耕地面积的刚性减少，提高玉米单产成为保障我国粮食安全的重要途径之一[2]。相关学者针对玉米单产的影响因素研究主要涉及自然因素和人为因素两方面[3-4]。在自然因素方面，气候变化背景下，干旱、强降水和高温等因素对玉米性状、单产影响显著[5]，且表现出明显地域差异，例如：李祎君[6]利用通径分析法探讨气象灾害对东北平原玉米单产及品质的影响，提出干旱已成为威胁玉米气候产量的首要灾害；江铭诺[7]等利用世界粮食作物研究模型（WOFOST）、奇异值分解（SVD）等方法分析华北平原不同区域夏玉米潜在产量，发现该区域夏玉米潜在产量减少与太阳总辐射下降有关；陈上[8]基于美国的农业技术转移决策支持系统（DSSAT）和机器学习算法预测黄土高原玉米产量，认为降水的年内分配不均和频发的干旱是限制玉米产量的主要因素；Chen等[9]基于DSSAT-CERES-Maize模型和极端气候指数探讨长江流域雨养农业区玉米单产对气候变化的响应，指出温度与玉米单产的相关性最高。在人为因素方面，合理的灌溉、施肥和播期等因素是玉米增产的重要途径，例如：Meng等[10]通过探讨净光合速率、气孔导度以

收稿日期：2022-11-15； **修订日期**：2022-12-25

基金项目：国家自然科学基金项目(41901071，41701062)；山西省基础研究计划面上项目(202103021224258)资助

作者简介：刘焕才(1986-)，男，博士，副教授，主要从事气候变化与区域可持续发展等方面的研究. E-mail: liuhc@sxnu.edu.cn

及蒸腾速率变化与灌水量的关系，发现适宜的灌水量有利于提高玉米干物质积累量和单产；吴晓丽等通过研究不同施肥模式下玉米各器官对氮、锌的吸收和累积，得出合理的施肥量和施肥技术可提高肥料利用率，进而促进玉米生长发育的结论[11-13]；薛庆禹等[14]通过设置不同播期下夏玉米的试验，发现夏玉米生育期随播期推迟而缩短。

目前，众多学者普遍选用各类作物模型研究作物生长发育过程及产量[15]，例如：澳大利亚的农业生产系统模拟器（APSIM）、美国的农业技术转移决策支持系统（DSSAT）、联合国粮食及农业组织发布的作物-水生产力模型（AquaCrop）、荷兰瓦赫宁根大学与国际水稻研究所联合开发的作物生长模拟系统（ORYZA）。其中，DSSAT模型作为全球应用最广泛的作物模型之一，能够在大量数据基础上综合考虑作物、环境和管理措施三者间的相互关系[16]，对特定区域作物品种的遗传参数进行本地化调试。在我国，多地已经利用该模型开展了相关研究工作，并取得良好适用效果，如：韩智博等[17]利用DSSAT模型开展未来气候变化对黑河流域玉米产量的影响研究，并提出玉米的适应性措施；王兴鹏等[18]基于DSSAT模型开展南疆地区膜下滴灌种植模式下的棉花灌溉定额研究，为播期及生育期灌溉管理提供借鉴。

西北干旱区土地资源丰富，光热充足，是我国粮食生产的战略后备区，但以干旱缺水为代表的众多因素长期制约着当地农业生产[19]。地处疏勒河流域中游地区的甘肃省玉门市作为我国西北干旱区的典型农业灌溉区和重要玉米产区，目前的研究多集中于气候变化对作物产量的影响，而将自然和人为因素对玉米性状及气候产量影响定量化的综合研究较少[20-22]。自然因素主要通过最高温、最低温、太阳辐射和CO_2等影响因子对粮食作物的生长发育和结实率产生重要影响[5-9]；另一方面，自然因素对粮食生长发育的作用会受到农户田间管理行为的影响[23-24]，即人为因素，例如：价格支持政策、包膜控释肥、喷滴灌、调整农时、补种补苗和覆盖棚膜等，可见自然因素和人为因素会共同作用于玉米性状和产量。因此，基于数据可获取性，本文选取最高温、最低温、太阳辐射、降水、风速等自然因素和化肥施用量、有效灌溉面积等人为因素，利用DSSAT-CERES-Maize模型定量评估其对玉米性状及气候单产的影响，以此探究当地玉米的适宜生长条件，为疏勒河流域乃至西北干旱区保障粮食安全提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省玉门市（39°40′~41°00′N，96°15′~98°30′E）位于疏勒河流域中游、河西走廊西端。该地光照充足，热量丰沛，但降水偏少，属大陆性中温带干旱气候[25]。玉米作为当地主要粮食作物之一，播种面积约占粮食作物总播种面积的26.76%，研究区玉米物候期尺度下的气象因子均值为：最高温29.01 ℃，最低温13.52 ℃，风速3.37 $m\cdot s^{-1}$，降水量56.85 mm。受区域降水少、年内年际变化大、蒸发大等因素影响，玉米生长用水高度依赖灌溉，疏勒河是其灌溉用水的主要水源。

1.2 数据来源

本文选取的数据类型有气象数据、土壤属性数据和田间管理数据。气象数据来源于全国温室共享平台，包括1990—2020年玉门逐日气象数据（最高温、最低温、风速、降水量和日照时数）。土壤属性数据来源于世界土壤数据库（Harmonized World Soil Database）的中国土壤数据集（http://vdb.soil.csdb.cn/），包括玉门地区的土壤质地组成、有机质含量、容重和土层全氮含量等。田间管理数据涉及生长阶段、施肥和灌溉等要素的技术信息，主要通过实地调研获取（表1）。

表1 田间管理要素技术信息

Tab. 1 Technical information of field management elements

要素	技术信息
生长阶段	苗期（4月15日—5月15日）、穗期（5月16日—7月20日）、花粒期（7月21日—9月30日）
复合肥施用（氮:磷:钾=1.0:0.7:0.5）	按基肥、种肥、苗肥、秆肥、穗肥和粒肥施入
灌溉	分苗水、拔节抽雄水和灌浆前、中期水灌入

1.3 研究方法

1.3.1 太阳辐射 太阳辐射对玉米的光合作用有重要作用，是作物生长模型的关键输入数据，其演变与日序时次的日照时长存在较高一致性[26]，因此本

文基于日照时数利用埃斯屈朗经验公式[27]计算太阳辐射。计算公式如下：

$$\delta = 0.4093 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times J - 1.045\right) \quad (1)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} \times J\right) \quad (2)$$

$$W_s = \arccos(-\tan\Phi \times \tan\delta) \quad (3)$$

$$R_{max} = 37.586 \times d_r \times (W_s \times \sin\Phi \times \sin\delta + \cos\Phi \times \cos\delta \times \sin W_s) \quad (4)$$

$$N = \frac{24}{\pi} W_s \quad (5)$$

$$R_s = R_{max} \times \left(a_s + b_s \times \frac{n}{N}\right) \quad (6)$$

式中：δ为太阳倾角(rad)；J为日序；d_r为日地相对距离；Φ为纬度(rad)；W_s为日落时角(rad)；R_{max}为地球外辐射(MJ·m^{-2})；R_s为太阳辐射(MJ·m^{-2})；n为实际日照时数(h)；N为最大可能日照时数(h)；n/N为相对日照；a_s、b_s为回归常数(a_s=0.25、b_s=0.5)，当阴天(n=0)时，到达地球表面的地球外辐射的透过系数为a_s；当晴天(n=N)时，到达地球表面的地球外辐射透过系数为$a_s + b_s$。

1.3.2 非参数Mann-Kendall检验法 目前，长期趋势分析包括增长和下降趋势的确定，研究表明，在分析趋势时，由于变量总体分布无法精确，非参数统计方法是效果较好的常用方法之一[28]。非参数Mann-Kendall检验法[29](M-K检验)是计算序列数据长期趋势的非参数统计方法，该方法无需数据服从标准正态分布[30]，可有效消除数据相关性和异常值对检验结果的影响[31]，以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称[32]。具体步骤如下：

设X_1、X_2、X_3、…、X_n为时间序列变量，n为时间序列长度，检验统计量(UF_K)公式为：

$$UF_K = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S<0 \end{cases} \quad (7)$$

其中，

$$S = \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{i-1} \mathrm{sign}(X_i - X_j) \quad (8)$$

$$\mathrm{sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} 1, & X_i - X_j > 0 \\ 0, & X_i - X_j = 0 \\ -1, & X_i - X_j < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (10)$$

式中：S为检验的统计量；VAR(S)为统计量S的方差；X_i、X_j分别为i、j年相应的测量值，i>j，UF_1=0。按时间序列X的逆序X_n，X_{n-1}，X_{n-2}，…，X_1，重复上述计算，得到UB_K，即：UB_K=−UF_K(K=n, n−1, …, 1)，UB_1=0。若UF_K>0，表示序列呈上升趋势；若UF_K<0，表示呈下降趋势；当UF_K或UB_K≥$U_{0.05}$=±1.96时，表示通过了0.05置信度显著性检验；当UF_K或UB_K≥$U_{0.01}$=±2.56时，表示通过了0.01置信度显著性检验；UF_K=UB_K的交叉点为突变点。

1.3.3 玉米气候单产的分离方法 玉米单产与农田种植技术、土壤肥力和病虫害等因素密切相关，为分析气象因子与单产的关系，本文利用5 a滑动平均法[32]分离趋势单产与气候单产。对于样本容量为n的单产序列，5 a滑动平均序列表示为：

$$Y_{(w)} = Y - Y_{(t)} \quad (11)$$

$$Y_{j(t)} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} x_{j-k+1} \quad (12)$$

式中：$Y_{(w)}$为玉米气候单产(kg·hm^{-2})；Y为实际单产(kg·hm^{-2})；$Y_{(t)}$为趋势单产(kg·hm^{-2})，$Y_{j(t)}$为第j年趋势产量滑动平均值(kg·hm^{-2})；k为滑动平均时间步长，取k=5；x_{j-k+1}为滑动步长年间第(j−k+1)年的实际单产(kg·hm^{-2})。

1.3.4 敏感度分析 本文将影响因子数据进行无量纲化处理后，分析玉米性状、气候单产对其敏感度[33]，公式如下：

$$Pheon = \beta_0 + \beta_1 \times T_{max} + \beta_2 \times T_{min} + \beta_3 \times SRAD + \beta_4 \times PRCP + \beta_5 \times WIND + \beta_6 \times Fer + \beta_7 \times Irr \quad (13)$$

式中：Pheno为玉米性状或气候单产；T_{max}为最高温(℃)；T_{min}为最低温(℃)；SRAD为太阳辐射(MJ·m^{-2})；PRCP为降水量(mm)；WIND为风速(m·s^{-1})；Fer为施肥量(t)；Irr为有效灌溉面积(hm^2)；β_0为截距项；β_1、β_2、β_3、β_4、β_5、β_6和β_7分别为气象单产或性状对最高温、最低温、太阳辐射、降水量、风速、施肥量和有效灌溉面积的敏感度。若β>0，说明影响因子对玉米气象单产或性状表现出正向敏感度，为促进效应；若β<0，则说明影响因子对玉米气象单产或性状表现出负向敏感度，为抑制效应；且|β|越大表示气象玉米单产和性状对影响因子越敏感。基于本文中玉米气象单产及性状对影响因子的敏感度变化范围

为−0.85~0.85，为方便比较，将敏感度进行A~−A分级排序，共计17级，相邻两级间相差0.1，由大到小依次为：A>B>C>D>E>F>G>H>I>−H>−G>−F>−E>−D>−C>−B>−A，其中I级敏感度的变化范围为−0.05~0.05。

1.3.5 CERES-Maize模型 CERES-Maize是DSSAT模型中的子模型，通过以日为时间步长模拟玉米在不同种植模式下性状、单产动态形成过程。模型输入数据包括气象数据、土壤数据、作物品种遗传参数以及农田管理实践数据等，其中受数据可获得性影响，太阳辐射数据需根据日照时数估算获得；玉米品种特性遗传参数通过最大似然估计模块GLUE模拟获得，包括：P1（从出苗到幼年结束所需的积温）、P2（光周期敏感参数）、P5（灌浆特性参数）、G2（单株最大穗粒数）、G3（最大灌浆速率参数）和PHINT（完成一片叶生长所需参数）。本文中，模型的输出数据涉及包括玉米单产在内的17种玉米性状，根据各类性状与影响因子的相关程度对相关性状进行分类（表2），其中，收获时单产和籽粒氮是反映玉米生产系统质量的核心性状[34]；影响玉米物质积累的各生长阶段物积速率和时长是玉米籽粒氮、单产的反映性状[35−39]。

表2 影响因子及其相关玉米性状

Tab. 2 Influencing factors and related maize traits

影响因子	相关性状	
	各生长阶段性状	收获时性状
温度（最高温、最低温）	物积速率、时长	根茎叶果重占比、籽粒氮
太阳辐射	物积速率、时长	粒数/叶面积、粒重/叶面积、籽粒氮
风速	物积速率、时长	全生育期总蒸腾量、籽粒氮
水肥	物积速率、时长	粒数、粒重、籽粒氮

作物参数调试运转过程中，本文利用“试错法”对玉门市的玉米参数值进行3次调试[40−41]，每次调试采用30000次运转，使其模拟单产等无限趋近于实际单产。使用归一化均方根差（nRMSE）来度量模拟值与实测值的相对差异程度，并用一致性指数（D）检验模拟值和实测值的吻合度[42]，公式如下：

$$\mathrm{nRMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-Q_i)^2}{n}}\times\frac{100\%}{\bar{O}} \quad (14)$$

$$D=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left|P_i-\bar{O}\right|-\left|O_i-\bar{O}\right|\right]}\right] \quad (15)$$

式中：P_i和O_i分别为模拟值和观测值；$\bar{O}$为观测平均值；i为序列值；n为样本数。若nRMSE值低于10%时，则模拟值与观测值的相对误差小，模拟精度高；若nRMSE值介于10%~20%，则模拟效果较好；若nRMSE值介于20%~30%，则模拟效果一般；若nRMSE值高于30%，则表明模拟效果差。D值越接近1，表明模拟值与观测值的一致性越高，模型的模拟效果越好，反之亦然。

通过1990—2020年玉米实际单产与模拟单产的对比分析发现（图1），nRMSE值为0.22%，D值为0.99，说明其品种参数对玉米单产的模拟精度高，可用于研究区玉米生产潜力模拟研究。

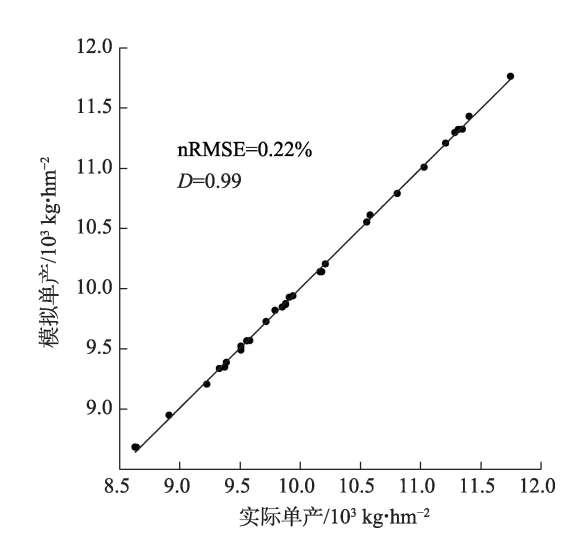


图1 单产的模拟值与实测值拟合结果

Fig. 1 Fitting results of simulated and measured yield per unit area

2 结果与分析

2.1 玉米性状及单产对影响因子的敏感度

2.1.1 气象因子时间变化特征 1990—2020年疏勒河中游地区物候期各气象因子（最高温、最低温、太阳辐射、风速、降水）无突变年份，物候期气候暖湿化特征显著，穗期的气象因子变化幅度明显高于其他生长阶段（图2）。其中，玉米各生长阶段的平均最高温和平均最低温呈现出上升趋势，除苗期平均

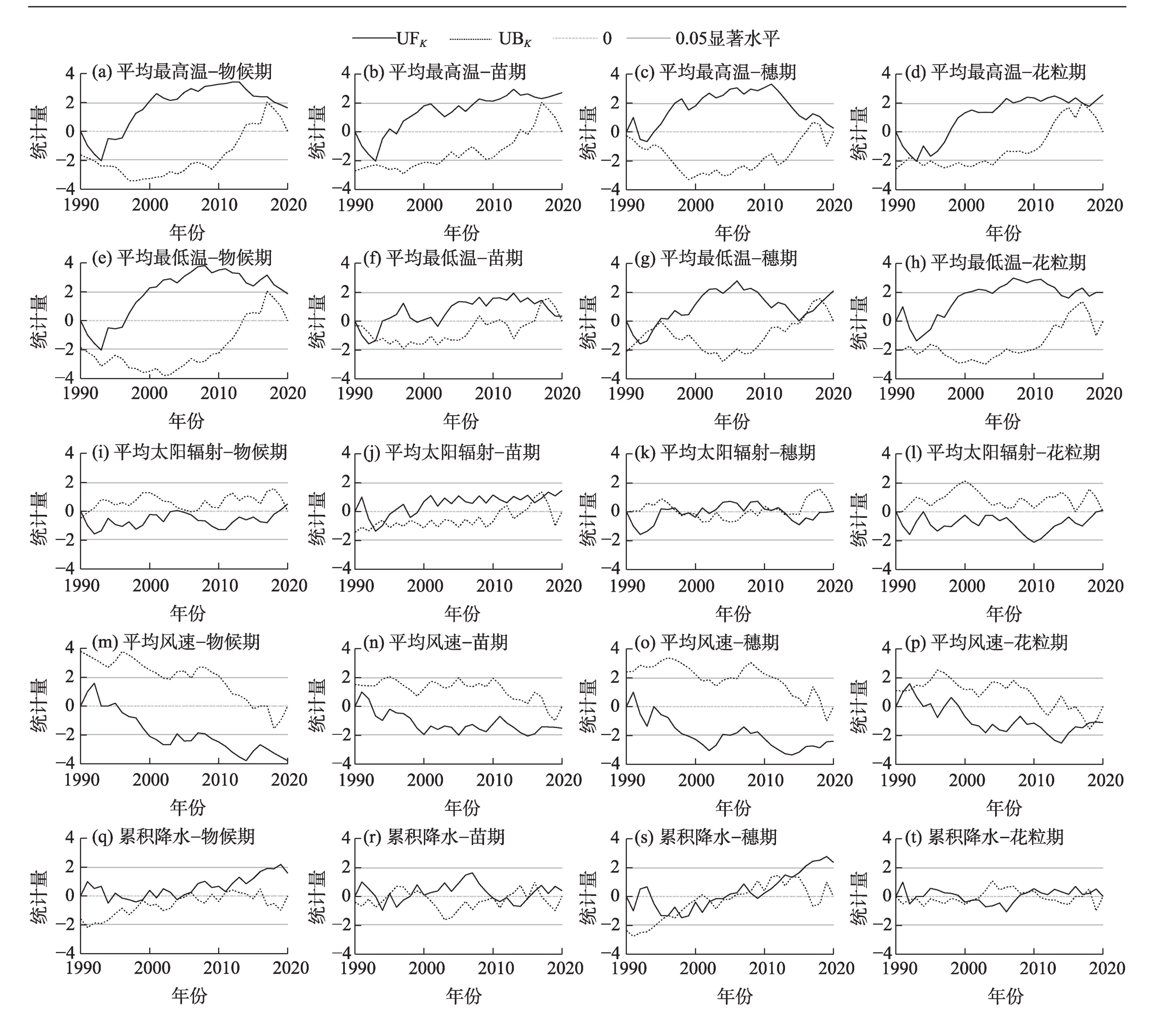


图2　1990—2020年玉门市玉米各生长阶段气象因子的Mann-Kendall检验

Fig. 2　Mann-Kendall of meteorological factors at each growth stage of maize in Yumen City from 1990 to 2020

最低温外，其他因子均存在超过α=0.05显著性水平的年份（临界值$U_{0.05}$=±1.96），物候期、苗穗期最高温表现出显著性上升趋势的年份早于花粒期；在平均太阳辐射部分，虽然苗期平均太阳辐射在2000年后由下降转变为上升，但花粒期平均太阳辐射在1995年后持续下降，并且在2010年表现出了显著性下降趋势，因此，物候期平均太阳辐射总体呈现出下降趋势；平均风速在玉米各生长阶段均呈现出显著性下降趋势，物候期、苗期和穗期在2000年左右开始表现为显著性下降趋势，花粒期则迟于其他生长阶段，物候期和穗期下降趋势超过了α=0.01显著性水平（临界值$U_{0.01}$=±2.56）；物候期累积降水量在2010年后呈现出上升趋势，2019年超过α=0.05显著性水平，其中苗期和花粒期表现为波动状态，因此其变化趋势主要是由于穗期累积降水量在2016—2020年上升趋势尤为明显。

2.1.2　水肥时间变化特征　玉门市玉米化肥施用量变化趋势可分为2个阶段（图3），第一阶段为1990—2012年，玉米化肥施用量随着年份增加呈现出极显著增加趋势，用量增加了259.00%；第二阶段为2013—2020年，化肥施用量呈现出减少趋势，用量减少了29.79%。玉米有效灌溉面积总体上呈现出增加趋势，其中1990—1991、2005—2009、2017—2020年增速较大，分别为118.65 $hm^2·a^{-1}$、57.46 $hm^2·a^{-1}$、

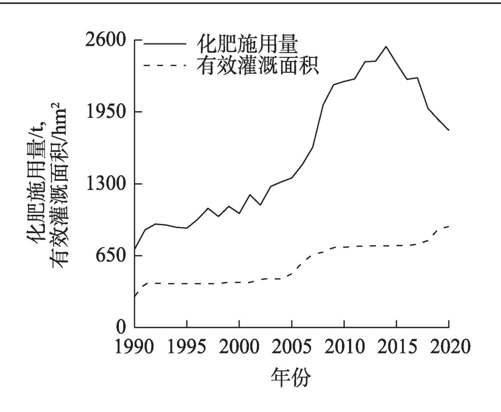


图3　1990—2020年玉门市玉米化肥施用量和有效灌溉面积

Fig. 3　Fertilizer application amount and effective irrigated area of maize in Yumen City from 1990 to 2020

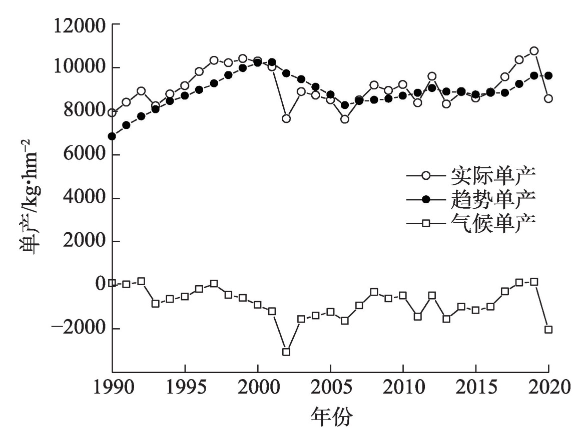


图4　玉米实际单产、趋势单产以及气候单产年际变化

Fig. 4　Interannual variations of actual yield per unit area, trend yield per unit area and climate yield per unit area

42.99 $hm^2·a^{-1}$,其余年份增速则较为缓慢。

2.1.3　玉米单产时间变化特征　将玉米的实际单产分离为趋势单产和气候单产(图4),1990—2020年玉米实际单产多年平均值为10078.75 $kg·hm^{-2}$,总体呈小幅增加趋势。趋势单产呈现出增加趋势,在20世纪90年代,当地政府快速推广优质品种、制定农业生产条件管理办法,旱地农田建设有一定成效,因此单产增速较快;2000—2005年由于水资源利用效率较低,玉米单产呈现出减少趋势;进入2006年后,随着玉米制种品种更新换代和农田水利建设有一定成效[43],单产变化较小,进入稳定状态。气候单产多年来平均值为190.35 $kg·hm^{-2}$,呈现出不显著减少趋势,但波动较大,变化范围为−2071.64~1158.21 $kg·hm^{-2}$,其中1992年和2019年为丰产年,2002年和2020年是较为明显的低产年。

2.1.4　玉米性状及气候单产对影响因子的敏感度　玉米不同性状及气候单产对影响因子响应程度存在差异,降水表现尤为明显,籽粒氮和气候单产等对其有较高敏感度,但收获时器官占比和全生育期蒸腾量对其敏感度都较低;最高温是对性状影响程度最大的影响因子,其中粒数、籽粒氮和气候单产都表现为较高正向敏感度(表3)。

分别选取敏感度排序靠前的3个影响因子作为玉米性状及气候单产的关键影响因子,分析在玉米各生长阶段,气候单产及性状对关键影响因子敏感度可知(表4)。仅气候单产而言,对最高温和降水

表3　物候期玉米性状及气候单产对影响因子的敏感度

Tab. 3　Sensitivity of maize traits and climatic yield per unit area to meteorological influencing factors at phenological period

物候期	最高温	最低温	太阳辐射	降水	风速	化肥施用量	有效灌溉面积
根重占比	F	E	−G	−E	−H	A	−B
茎重占比	−G	F	H	−G	I	F	C
叶重占比	−F	G	H	−H	I	H	A
果重占比	−F	G	G	−H	I	I	A
粒数/叶面积	−B	E	F	−D	D	F	H
粒重/叶面积	−A	D	F	−C	E	F	−H
全生育期蒸腾量	−D	E	H	I	H	B	−F
粒数	A	−G	I	B	G	C	F
粒重	−F	D	−G	−A	H	−G	−D
籽粒氮	B	−H	−F	−C	−H	−E	−F
气候单产	C	−A	H	D	E	−F	E

注:基于本文中玉米气象单产及性状对影响因子的敏感度变化范围为−0.85~0.85,为方便比较,将敏感度进行A~−A分级排序,共计17级,相邻两级间相差0.1,由大到小依次为:A>B>C>D>E>F>G>H>I>−H>−G>−F>−E>−D>−C>−B>−A,其中I级敏感度的变化范围为−0.05~0.05。下同。

表现出强正向敏感度，对最低温表现出强负向敏感度；玉米性状则对穗期花粒期最低温、化肥施用量和有效灌溉面积表现为强正向敏感度，穗期、花粒期最高温表现为强负向敏感度。在不同生长阶段，同一性状对相同影响因子响应程度也存在差异，其中穗期气象因子敏感度最高，因此穗期是对玉米生长发育造成影响的关键时期。

2.2 玉米性状及气候单产对影响因子的敏感性试验

为进一步定量化探究最高温、最低温、太阳辐射、风速和水肥等影响因子对玉米性状及气候单产的影响程度，选择气候条件、玉米单产最接近多年平均值的2017年为典型年份开展相关敏感性模拟试验，影响因子的参数设置参考当地实际情况(表5)。

2.2.1 玉米性状及气候单产对温度因子的敏感性 低温和高温均会影响玉米生长发育，当温度变化<−1.28 ℃时，低温将会导致花粒期物积速率降低，苗穗期时长延长，根、果重占比降低，茎重占比增加，最终引起气候单产降低；当温度变化>1.12 ℃时，高温延长了苗穗期时长，玉米果重占比降低，根、茎、叶重占比增加，使得籽粒氮和气候单产表现出降低趋势(图5)。因此，玉门市玉米的适宜温度变化范围为−1.28~1.12 ℃，即：最高温变化范围为14.80~38.72 ℃，最低温变化范围为−0.38~22.32 ℃，在此范围内，温度升高将加快玉米苗穗期物积速率，缩短苗穗期时长，增加果重占比，使得玉米气候单产和籽粒氮增加。

2.2.2 玉米性状及气候单产对太阳辐射因子的敏感性 当太阳辐射变化>−0.15 MJ·m^{-2}时，随太阳辐射的增强，苗期物积速率加快、时长延长，穗期物积速率无明显表现但时长缩短，花粒期物积速率和时长

表4 各生长阶段玉米性状及气候单产对影响因子敏感度

Tab. 4 Sensitivity of maize traits and climatic yield per unit area to influencing factors at each growth stage

影响因子	最高温			最低温			太阳辐射			降水			风速			化肥施用量			有效灌溉面积		
生长阶段	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期	苗期	穗期	花粒期
根重占比	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I	I	−H	–	–	–	A	A	A	−F	−D	−C
茎重占比	–	–	–	I	E	G	–	–	–	–	–	–	–	–	–	G	C	F	A	F	B
叶重占比	I	I	I	I	E	G	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	A	D	A
果重占比	−H	−H	−H	I	E	G	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	A	C	A
粒数/叶面积	I	−E	−G	–	–	–	–	–	–	D	D	I	−G	I	I	–	–	–	–	–	–
粒重/叶面积	H	−E	−G	−E	A	E	–	–	–	E	E	I	–	–	–	–	–	–	–	–	–
全生育期蒸腾量	I	−E	−H	−H	H	D	–	–	–	–	–	–	–	–	–	A	C	C	–	–	–
粒数	H	B	E	–	–	–	–	–	–	F	F	H	–	–	–	A	A	A	–	–	–
粒重	–	–	–	−E	B	D	–	–	–	H	H	−G	–	–	–	–	–	–	−G	−E	G
籽粒氮	E	G	D	–	–	–	–	–	–	−F	−E	−H	–	–	–	−F	−E	−F	–	–	–
气候单产	G	−G	F	−E	−E	−D	–	–	–	F	−H	G	–	–	–	–	–	–	–	–	–

注："–"表示未对非关键影响因子的敏感度进行分析。

表5 影响因子参数设置

Tab. 5 Parameter setting of influencing factors

影响因子	依据	影响因子参数
温度	1990—2020年玉米物候期温度年均增长0.165 ℃	−2.08 ℃<温度变化<1.92 ℃，逐步加减0.16 ℃，共计26种
太阳辐射	1990—2020年玉米物候期太阳辐射变化幅度为1 MJ·m^{-2}	−0.5 MJ·m^{-2}<太阳辐射变化<0.5 MJ·m^{-2}，逐步加减0.0 MJ·m^{-2}，共计21种
风速	1990—2020年玉米物候期风速年均增长0.03 m·s^{-1}	−0.66 m·s^{-1}<风速变化<0.66 m·s^{-1}，逐步加减0.03 m·s^{-1}，共计45种
水肥	2017年物候期降水量约为66.5 mm，玉米全生育期需水量约为410~699 mm	全生育期灌水约25次，每次灌溉量分别为W_0(0 mm)、W_1(15 mm)、W_2(30 mm)；全生育期施入复合肥6次，基肥约占总施肥量的66.67%，其余5次每次施肥量分别为F_0(0 kg·hm^{-2})、F_1(10 kg·hm^{-2})、F_2(20 kg·hm^{-2})；灌溉施肥组合处理方式共计9种。

均表现为增加趋势(图6),在此基础上,在太阳辐射变化>0.30 MJ·m⁻²时,随太阳辐射的增强,粒重/叶面积、粒数/叶面积、籽粒氮和气候单产均表现为增加趋势。因此,玉门市玉米的适宜太阳辐射变化幅度为:0.30~0.50 MJ·m⁻²,即:太阳辐射变化范围为3.93~25.15 MJ·m⁻²,在此范围内,太阳辐射增强,花前干物质积累量增加,花后玉米生长发育运输速率加快,使得玉米籽粒氮和气候单产上升。

当太阳辐射变化<−0.15 MJ·m⁻²时,受弱光条件影响,玉米穗期物积速率降低、时长增加,导致花粒期物积速率和时长、粒重/叶面积、粒数/叶面积、籽粒氮、气候单产均表现为减少趋势。

2.2.3 玉米性状及气候单产对风速因子的敏感性 风速过大或过小均不利于玉米生长发育。当风速变化≤−0.39 m·s⁻¹时,随风速增大,尽管苗穗期物积速率呈现上升趋势,但花粒期物积速率和时长均表现为减少趋势,进而引起玉米蒸腾量和籽粒氮减少(图7);当风速变化≥0.30 m·s⁻¹时,随风速增大,苗穗期时长缩短,花粒期时长延长,籽粒氮上升,但全生育期蒸腾量过度下降,物质积累量较少,气候单产减少。

当风速变化介于−0.39~0.30 m·s⁻¹时,随风速增大,苗穗期物积速率表现为波动趋势,时长为减少趋势;蒸腾量由增加转变为减少趋势;花粒期物积速率和时长、气候单产、籽粒氮均表现为增加趋势。因此,研究区玉米的适宜风速变化为:−0.39~0.30 m·s⁻¹,即:风速变化范围为0~3.81 m·s⁻¹,随风速增大,花粒期物积速率上升,时长延长,籽粒氮和气候单产上升。

2.2.4 玉米性状及气候单产对水肥因子的敏感性 玉米的气候单产、籽粒氮、籽粒数和籽粒重均随水肥施

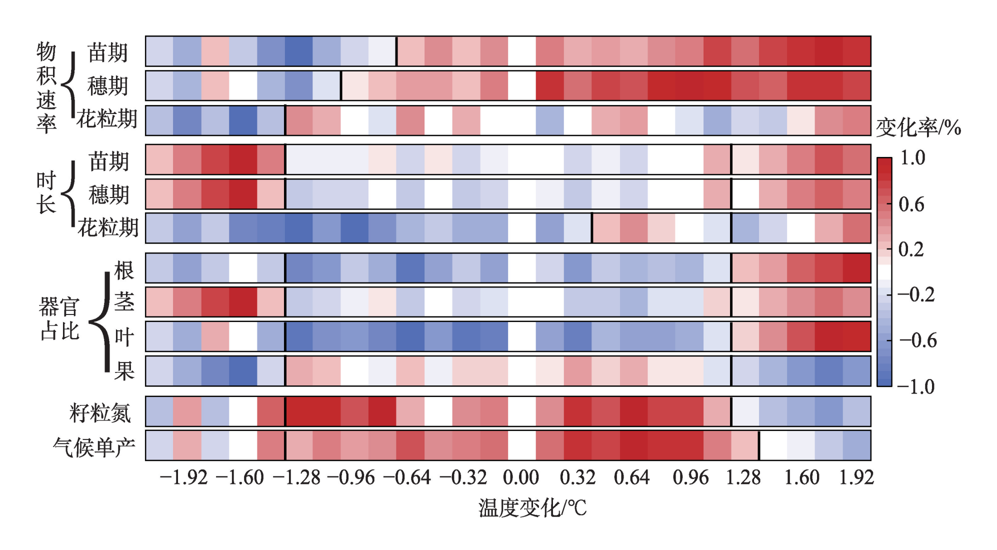


图5　温度变化时玉米性状及气候单产变化率

Fig. 5　Change rate of maize traits and climatic yield per unit area under temperature change

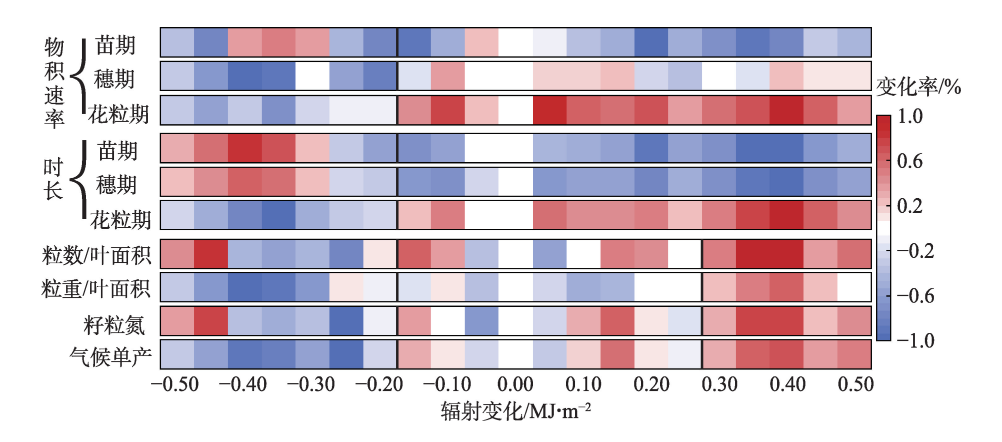


图6　太阳辐射变化时玉米性状及气候单产变化率

Fig. 6　Change rate of maize traits and climatic yield per unit area under the change of solar radiation

入量的增加呈现出"中高周低"的分布特征(图8),按各性状数值大小,将水肥处理分为5级:(1) W_1F_1;(2) W_0F_1、W_1F_0、W_1F_2、W_2F_1;(3) W_0F_2、W_2F_0;(4) W_2F_2;(5) W_0F_0。当水肥投入量处于W_1F_1(灌溉15 mm,施肥10 kg·hm^{-2})时,玉米各性状数值达到最大,即:中等程度的灌溉和施肥有助于增产。但无水、无肥、高水或高肥均会引起玉米不同程度减产,其中,当灌溉量处于W_1或施肥量处于F_1时,减少幅度最小;当灌溉施肥量处于W_0F_0(灌溉0 mm,施肥0 kg·hm^{-2})时,减少幅度最大。尽管合理灌溉施肥条件对玉米性状有明显的促进作用,但不同性状对水肥的响应程度不同,由大到小排序为气候单产>籽粒数>籽粒氮>籽粒重。

3 讨 论

最高温、最低温、降水等自然因素和化肥施用量、有效灌溉面积等人为因素在玉米生长发育中起着关键作用[44],但由于地理环境差异,不同地区玉米对主要影响因子的响应形式存在差异[45]。本文指出地处西北地区的疏勒河中游地区玉米性状和气候单产对苗期最高温表现为正向敏感度,这是由于苗期最高温并未超过幼苗适宜生长的上限温度35~40 ℃[46],因此,最高温的适当升高可以提高该地区玉米幼苗发芽率、根重占比和物质积累速率[47];

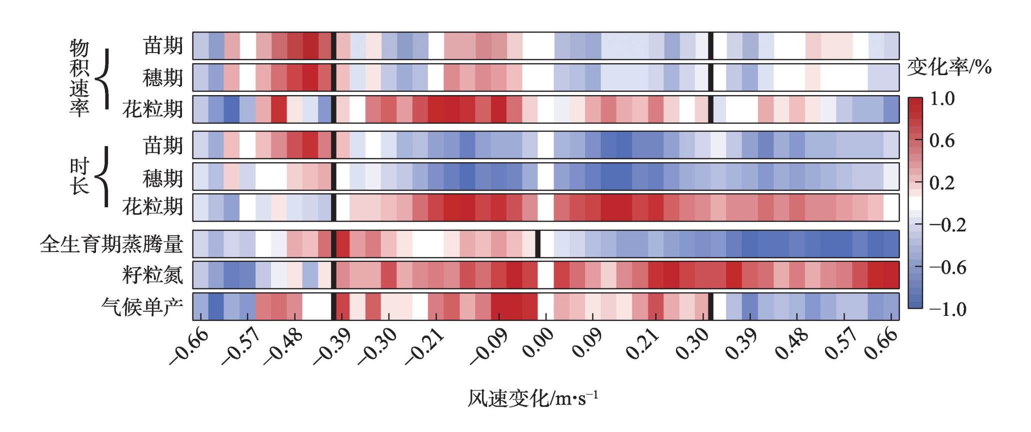


图7　风速变化时玉米性状及气候单产变化率

Fig. 7　Change rates of maize traits and climatic yield per unit area under the change of wind speed

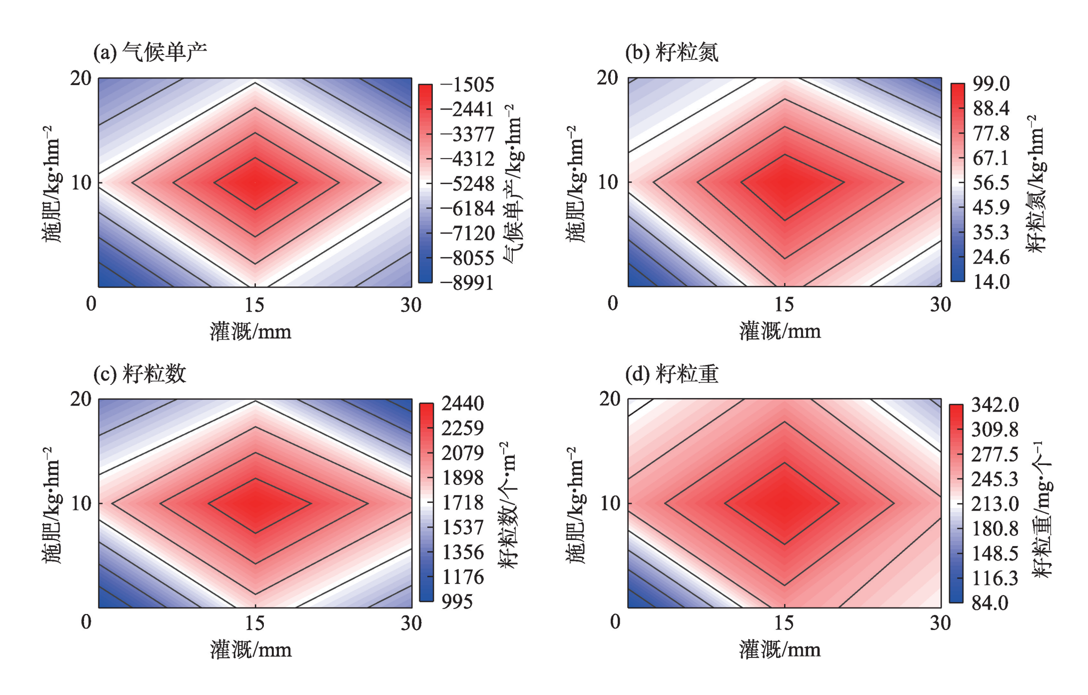


图8　水肥变化时玉米性状及气候单产变化

Fig. 8　Changes of maize traits and climatic yield per unit area under the change of water and fertilizer

相反，近31 a来，当地苗期最低温的下限温度范围为−1.5~7.5 ℃，尽管亦呈现一定程度的增加趋势，但总体仍低于玉米苗期最低温的适宜下限温度6~10 ℃[46]，不利于玉米增产。由于玉米属于喜温作物，穗期、花粒期最低温适当的增加可以加快物质积累速率，从而提高玉米单产[48]；相反，在降水稀少的西北内陆地区，穗期、花粒期极端高温会加快水分蒸发速率，缩短生育期长度，使玉米减产[49]。除此之外，降水、有效灌溉面积和化肥施用量在全生育期对玉米性状和气候单产均起到正向促进作用，其中玉米是生育期内需水较多的旱作作物[50]，特别是对于西北干旱区而言，有效降水的增多可以大大促进干物质积累、植株吐丝和授粉，降低水胁迫产生的可能性[51]，同时合理灌溉也可以缓解降水不足对玉米单产的负面影响[52]，促进玉米生长发育。2013年以来玉门市化肥施用量显著降低，但由于农田水利建设的有效推进，可提高化肥利用效率，进而释放玉米高产潜力[53]。

由此可见，该地区极端恶劣的自然条件使得当地玉米性状和气候单产对众多自然因素和人为因素都存在极高敏感度，表现出一定独特性。因此，为保障疏勒河中游地区的粮食安全，根据本文研究，该地区需提高应对极端高温或极端降水等事件的能力，同时建议高效利用疏勒河流域的热量资源，通过地表覆膜、调整播期、土地秋翻等人工保温措施，规避低温胁迫，降低生产风险；通过推行节水灌溉、秸秆还田等农田管理措施，提高水资源利用效率，改善土壤肥力，提高玉米生产潜力，发展与气候变化相适应的优质农业。

4 结 论

本文在研究我国疏勒河中游地区玉米种植对气象因子与水肥因子的敏感度基础上，利用DSSAT-CERES-Maize模型定量评估主要影响因子对玉米性状和气候单产的影响，得到了如下结论：

（1）1990—2020年地处疏勒河中游地区的玉门市最高温、最低温和降水量变化呈上升趋势，太阳辐射和风速呈下降趋势，气候暖湿化特征显著。玉米化肥施用量1990—2012年呈现出增加趋势，2013—2020年呈现出减少的变化趋势，有效灌溉面积则呈现出持续增加趋势。

（2）玉米实际单产总体呈现出小幅增加趋势，其中趋势单产受政府快速推广优质品种和农田水利建设等政策的影响，呈现出增加−减少−稳定的变化趋势；玉米气候单产总体上则呈现出减少趋势，但波动较大，敏感度分析结果表明，其对最高温和降水表现出强正向敏感度，对最低温表现出强负向敏感度；玉米性状的敏感度分析结果表明，其对化肥施用量、有效灌溉面积和穗期、花粒期的最低温表现为强正向敏感度，对穗期、花粒期最高温表现为强负向敏感度。

（3）通过主要影响因子对玉米性状、气候单产影响模拟试验研究发现，最高温、最低温、风速和水肥因子与性状、气候单产存在“倒U型”关系，即：随着上述影响因子数值的增大，其对玉米性状、气候单产的影响由促进效应转变为抑制效应；太阳辐射与性状、气候单产存在“U型”关系，即：随着太阳辐射增强，对玉米性状和气候单产的影响由抑制效应转变为促进效应。疏勒河中游地区玉米植株生长发育的适宜条件为：最高温（14.80~38.72 ℃）、最低温（−0.38~22.32 ℃）、太阳辐射（3.93~25.15 $MJ\cdot m^{-2}$）、风速（0~3.81 $m\cdot s^{-1}$）以及实际降水基础上的灌溉量（15 mm）和施肥量（10 $kg\cdot hm^{-2}$）。

参考文献（References）

[1] 王钢，钱龙. 新中国成立70年来的粮食安全战略：演变路径和内在逻辑[J]. 中国农村经济, 2019(9): 15−29. [Wang Gang, Qian Long. Grain security strategy in the 70 years since the founding of new China: Evolution path and internal logic[J]. Chinese Rural Economy, 2019(9): 15−29.]

[2] 周宝元，葛均筑，孙雪芳，等. 黄淮海麦玉两熟区周年光温资源优化配置研究进展[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1843−1853. [Zhou Baoyuan, Ge Junzhu, Sun Xuefang, et al. Research advance on optimizing annual distribution of solar and heat resources for double cropping system in the Yellow-Huaihe-Haihe Rivers Plain [J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(10): 1843−1853.]

[3] Gheysari M, Mirlatifi S M, Bannayan M, et al. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage[J]. Agricultural Water Management, 2008, 96(5): 809−821.]

[4] 银敏华，李援农，李昊，等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129−138. [Yin Minhua, Li Yuannong, Li Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (6): 129−138.]

[5] 宋利兵. 气候变化下中国玉米生长发育及产量的模拟[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020. [Song Libing. Simulation of maize growth and yield under climate change in China[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020.]

[6] 李祎君, 吕厚荃. 气候变化背景下农业气象灾害对东北地区春玉米产量影响[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1537−1545. [Li Yijun, Lü Houquan. Effect of agricultural meteorological disasters on the production corn in the northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(6): 1537−1545.]

[7] 江铭诺, 刘朝顺, 高炜. 华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 865−876. [Jiang Mingnuo, Liu Chaoshun, Gao Wei. Analysis of spatial and temporal variation in potential summer maize yield and its response to climate change in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 865−876.]

[8] 陈上. 集成CERES-Maize模型和机器学习算法的玉米产量动态预测方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022. [Chen Shang. dynamic in-season maize yield predictions based on the CERES-Maize model and machine learning methods[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020.]

[9] Chen X X, Wang L C, Niu Z G, et al. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 282−283: 107867, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107867.

[10] Meng F C, Zhang J H, Yao F M, et al. Interactive effects of elevated CO_2 concentration and irrigation on photosynthetic parameters and yield of maize in northeast China[J]. PLoS One, 2014, 9(5): e98318, doi: 10.1371/journal.pone.0098318.

[11] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889−1898. [Wu Xiaoli, Li Chaosu, Tang Yonglu, et al. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1889−1898.]

[12] 张磊, 王立春, 孔丽丽, 等. 不同施肥模式下春玉米养分吸收利用和土壤养分平衡研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1169−1176. [Zhang lei, Wang Lichun, Kong Lili, et al. Nutrient utilization and soil nutrient balance of spring maize under different fertilizer application modes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1169−1176.]

[13] 张盼盼, 邵运辉, 刘京宝, 等. 施用氮锌肥对不同夏玉米品种干物质和氮锌元素累积分配的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(2): 96−103. [Zhang Panpan, Shao Yunhui, Liu Jingbao, et al. Effect of nitrogen and zinc application on the accumulation and distribution of dry matter and nitrogen and zinc of different summer maize varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(2): 96−103.]

[14] 薛庆禹, 王靖, 曹秀萍, 等. 不同播期对华北平原夏玉米生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(5): 30−38. [Xue Qingyu, Wang Jing, Cao Xiuping, et al. Effect of sowing date and variety on growth and population characteristics of summer maize in North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(5): 30−38.]

[15] 李波, 孙翔龙, 姚名泽, 等. 温室秸秆不同还田量条件下DSSAT-CROPGRO-Tomato模型的调参与验证[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 908−918. [Li Bo, Sun Xianglong, Yao Mingze, et al. Parameter estimation and verification of the DSSAT-CROPGRO-Tomato model under the condition of different amounts of straw returned to the field in the greenhouse[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 908−918.]

[16] Bai Y, Yue W J, Ding C M. Optimize the irrigation and fertilizer schedules by combining DSSAT and genetic algorithm[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29: 52473−52482.

[17] 韩智博, 张宝庆, 田杰, 等. 基于CCSM4气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 108−115. [Han Zhibo, Zang Baoqing, Tian Jie, et al. Yield of the maize in Heihe oasis under climate change in northwest China predicted based on the CCSM4 climate model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 108−115.]

[18] 王兴鹏, 辛朗, 杜江涛, 等. 基于DSSAT模型的南疆膜下滴灌棉花生长与产量模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 314−321. [Wang Xingpeng, Xin Lang, Du Jiangtao, et al. Simulation of cotton growth and yield under film drip irrigation condition based on DSSAT model in southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 314−321.]

[19] 钟钰, 甘林针. 资源约束下西北旱区保障粮食安全的路径研究[J]. 中州学刊, 2022(8): 42−50. [Zhong Yu, Gan Linzhen. Study on the path of ensuring grain security in northwest arid area under the constraint of resources[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2022(8): 42−50.]

[20] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1−11. [Guo Jianping. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1−11.]

[21] Quan H, Ding D Y, Wu L H, et al. Future climate change impacts on mulched maize production in an arid irrigation area[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107550, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107550.

[22] Jiang Y W, Zhang L H, Zhang B Q, et al. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 37−45.

[23] 董文俊, 刘健峰, 丁奠元, 等. 旱作覆膜玉米生长和水分利用对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 1−12, 21. [Dong Wenjun, Liu Jianfeng, Ding Dianyuan, et al. Response of maize growth and water utilization under plastic mulching in dryland to climate change[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 1−12, 21.]

[24] 梁茜, 吴清山, 葛均筑, 等. 播期对华北平原雨养夏玉米产量形

成与资源利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 136-143. [Liang Qian, Wu Qingshan, Ge Junzhu, et al. Effects of sowing date on rain-fed summer maize yield formation and resource utilization in North China Plain[J]. Crops, 2021(4): 136-143.]

[25] 章慧, 董艳, 张慧荟, 等. 西北旱区主要气候资源的空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 129-135. [Zhang Hui, Dong Yan, Zhang Huihui, et al. Spatial variability of main climatic resources in northwest arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(8): 129-135.]

[26] 孙睿, 梁璐, 杨玲. 基于气象站资料的中国地区太阳日辐射量算法研究[J]. 气象与环境科学, 2007(1): 24-27. [Sun Rui, Liang Lu, Yang Ling. Estimation of daily solar radiation in China based on weather station data[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007(1): 24-27.]

[27] 吴林荣, 王娟敏, 刘海军, 等. 陕西省太阳辐射及其日照时数的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 212-214. [Wu Linrong, Wang Juanmin, Liu Haijun, et al. Spatiotemporal variation of solar radiation and sunshine hours in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 212-214.]

[28] 郝家威. 水汽对温度变化的响应及两者在降水变率中的协同作用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. [Hao Jiawei. The response of water vapor to temperature change and their synergies in precipitation variability[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.]

[29] 陈跃萍, 武胜利, 赵昕, 等. 近60 a哈密市极端气温时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 868-879. [Chen Yueping, Wu Shengli, Zhao Xin, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme temperatures in Hami City in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 868-879.]

[30] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.

[31] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1): 254-271.

[32] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 13-18. [Fang Shibo. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 13-18.]

[33] 骆玉川, 张朝, 张亮亮, 等. 冬小麦物候的时空变化模拟及其气候驱动因素解析——基于改进的pDSSAT模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(1): 126-143. [Luo Yuchuan, Zhang Chao, Zhang Liangliang, et al. Simulation of spatio-temporal variation of winter wheat phenology and analysis of climate driving factors based on improved pDSSAT model[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(1): 126-143.]

[34] 曲俊杉, 洪明, 常浩, 等. 水氮供应对北疆春玉米产量、水氮利用及品质的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(2): 125-135. [Qu Junshan, Hong Ming, Chang Hao, et al. Effects of water and nitrogen supply on yield, water-nitrogen utilization and quality of spring maize in northern Xinjiang[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31 (2): 125-135.]

[35] 唐霞, 崔建垣, 曲浩, 等. 风对科尔沁地区几种常见作物幼苗光合、蒸腾特性的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 471-476. [Tang Xia, Cui Jianyuan, Qu Hao, et al. Impact of wind on seedling's photosynthesis and transpiration of several common crops in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(3): 471-476.]

[36] 王娇, 李萍, 宗毓铮, 等. 大气CO_2浓度和气温升高对玉米灌浆期碳氮代谢的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31 (2): 325-335. [Wang Jiao, Li Ping, Zong Yuzheng, et al. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration and increased temperature on the metabolism of carbon and nitrogen of maize at grain filling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 325-335.]

[37] 肖让, 康永德, 张永玲, 等. 河西走廊制种玉米不同施肥与灌溉定额优化研究[J]. 节水灌溉, 2021(12): 30-37. [Xiao Rang, Kang Yongde, Zhang Yongling, et al. Optimization of different fertilization and irrigation quota for seed maize production in Hexi Corridor[J]. Water Saving Irrigation, 2021(12): 30-37.]

[38] 付江鹏, 贺正, 贾彪, 等. 滴灌施氮水平下玉米籽粒灌浆过程模拟[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 157-164. [Fu Jiangpeng, He Zheng, Jia Biao, et al. Simulation of maize grain filling process under nitrogen drip irrigation[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 157-164.]

[39] 李宗南. 基于光能利用率模型和定量遥感的玉米生长监测方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [Li Zongnan. Research on method of maize growth monitoring using light use efficiency model and quantitative remote sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural, 2014.]

[40] 杜江涛, 张楠, 龚珂宁, 等. 基于DSSAT模型的南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3760-3768. [Du Jiangtao, Zhang Nan, Gong Ke'ning, et al. Optimization of cotton irrigation schedule under mulch drip irrigation in southern Xinjiang based on DSSAT model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3760-3768.]

[41] 李彤霄, 刘佳, 李聪, 等. 基于大豆观测数据的DSSAT和WOFOST模型模拟比较研究[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 9-15. [Li Tongxiao, Liu Jia, Li Cong, et al. Comparative study of DSSAT and WOFOST models based on soybean observation data[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021, 44(2): 9-15.]

[42] 王文佳, 冯浩. 基于CROPWAT-DSSAT关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 795-802. [Wang Wenjia, Feng Hao. Water requirement and irrigation systems of winter wheat: CROPWAT-DSSAT model solution in Guanzhong district[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 795-802.]

[43] 玉门市统计局. 玉门市国民经济和社会发展统计公报[R]. 玉

门: 玉门市统计局, 1990—2020. [Yumen Municipal Bureau of Statistics. Statistical bulletin of Yumen national economic and social development[R]. Yumen: Yumen Municipal Bureau of Statistics, 1990—2020.]

[44] 程志强, 蒙继华. 作物单产估算模型研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 402-415. [Cheng Zhiqiang, Meng Jihua. Research advances and perspectives on crop yield estimation models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 402-415.]

[45] 赵俊芳, 李宁, 候英雨, 等. 基于APSIM模型评估北方八省春玉米生产对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2): 108-118. [Zhao Junfang, Li Ning, Hou Yingyu, et al. Evaluation of response of spring maize production to climate change in the eight provinces of northern China based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(2): 108-118.]

[46] 杜桂娟, 曹敏建, 马凤江, 等. 播期对下茬青贮玉米物质生产特性的影响及气象条件分析[J]. 作物杂志, 2009(2): 36-40. [Du Guijuan, Cao Minjian, Ma Fengjiang, et al. Influence of sowing date on production characteristics of silage corn for the aftercrop and analysis of meteorological conditions[J]. Crops, 2009(2): 36-40.]

[47] 杨德光, 孙玉珺, Ali Raza Irfan, 等. 低温胁迫对玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(5): 1-8, 44. [Yang Deguang, Sun Yujun, Ali Raza Irfan, et al. Effect of low temperature stress on germination and physiological of maize seedling[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(5): 1-8, 44.]

[48] 陈文婷, 周曙东. 不同生长阶段降水对夏玉米产出的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2022, 21(4): 91-103. [Chen Wenting, Zhou Shudong. Impact of precipitation at different growth stages on summer maize yield[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2022, 21(4): 91-103.]

[49] 杨笛, 熊伟, 许吟隆, 等. 气候变化背景下中国玉米单产增速减缓的原因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 231-238. [Yang Di, Xiong Wei, Xu Yinlong, et al. Analysis of reason for recent slowing maize yield increase under climate change in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(Suppl. 1): 231-238.]

[50] 徐晨, 闫伟平, 孙宁, 等. 不同灌水处理对春玉米生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 7-14. [Xu Chen, Yan Weiping, Sun Ning, et al. The impacts of irrigation amount on physiological characteristics and yield of spring maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 7-14.]

[51] 帅艳民, 武梦瑾, 吴昊, 等. 东北春玉米全生育期气候适宜度评价[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 238-247. [Shuai Yanmin, Wu Mengjin, Wu Hao, et al. Evaluation of climate suitability of spring maize during the whole growth period in northeast China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 238-247.]

[52] 王钧, 李广, 闫丽娟, 等. 气候变化背景下甘肃农牧交错带玉米气候生产潜力和资源利用效率变化特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 160-168. [Wang Jun, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Variation characteristics of climatic potential yield and resources utilization efficiency of maize in agro-pastoral transitional zone of Gansu, China under the background of climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 160-168.]

[53] 贾国燏, 骆洪义, 褚屿, 等. 不同灌溉方式下水肥一体化对玉米养分吸收规律的影响[J].节水灌溉, 2022(2): 40-47. [Jia Guoyu, Luo Hongyi, Chu Yu, et al. Effects of water and fertilizer integration on nutrient absorption of maize under different irrigation modes[J]. Water Saving Irrigation, 2022(2): 40-47.]

Influencing factors of maize traits and yield per unit area in the middle reaches of Shule River Basin

LIU Huancai[1,2], SHI Shuqi[1], LI Man[1], ZHANG Yanfang[1], HAN Li[1]

(1. College of Geography, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China; 2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: The Shule River Basin is an important grain-producing area in northwest China. Exploring the influence of climate change and human activities on grain production in this region can provide an important scientific basis for promoting regional food security. In this paper, Yumen City, located in the middle reaches of the Shule River Basin, was used as a representative research area. The sensitivity of maize traits and maize yield per unit area to natural factors (maximum temperature, minimum temperature, solar radiation, wind speed, and precipitation) and human factors (policy, irrigation amount, and fertilizer amount) was analyzed using meteorological, field management, soil property, and yield data from 1990 to 2020, based on which 2017 was selected as a typical year. The DSSAT-CERES-Maize model was used to quantitatively analyze the influence of natural and human factors on maize traits and climatic yield per unit area, and the most suitable conditions for maize growth and development in the study area were thus identified. The results showed that: (1) Middle reaches of the Shule River Basin have a warm and humid climate. Fertilizer application showed an increasing-decreasing trend and effective irrigated area showed a continuously increasing trend. (2) Actual yield per unit area showed a slightly increasing trend, and yield per unit area showed an increasing-decreasing-stable trend due to the influence of policies promoting high-quality maize varieties and farmland water conservation measures. Climatic yield per unit area showed a decreasing trend with strong positive sensitivity to the highest moderate precipitation and a strong negative sensitivity to the lowest low temperature. Maize traits showed strong positive sensitivity to fertilizer application quota, effective irrigated area, and lowest temperatures at ear and flowering stages, and strong negative sensitivity to highest temperatures at ear and flowering stages. (3) The optimum conditions for maize growth and development in the study area were found to be as follows: a highest temperature range of 14.80−38.56 ℃, a lowest temperature range of −0.38−22.16 ℃, a solar radiation range of 3.93−25.15 $MJ \cdot m^{-2}$), a wind speed range of 0−3.81 $m \cdot s^{-1}$, an irrigation amount of 15 mm, and a fertilizer application rate of 10 $kg \cdot hm^{-2}$. Within these ranges, the relationship between solar radiation and maize traits and yield was U-shaped, while the relationships between maximum temperature, minimum temperature, wind speed, and water and fertilizer factors and maize traits and yield were inverted U-shaped.

Key words: maize; influencing factor; yield per unit area; traits; Shule River Basin